干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

1985—2016年民勤地下水位及储变量动态特征分析

魏士禹[1,2]， 郭云彤[1]， 崔亚莉[1]， 张秋兰[1]， 邵景力[1]
（1. 中国地质大学，北京 100083；2. 水利部海河水利委员会，天津 300170）

摘 要：民勤地处两大沙漠之间，近几十年地下水位持续下降，水资源严重短缺。为正确指导当地地下水合理开发利用和生态恢复，剖析多年来的地下水开发利用过程和地下水动态变化特征尤为重要。在收集并分析了138眼监测井水位数据的基础上，划定出民勤县地下水动态类型分区，并利用克里金插值法绘制了民勤盆地1985—2016年逐年地下水流场和水位变幅图，采用网格法计算出地下水多年储变量。同时，探究了民勤盆地地下水位的影响因素，得到回归方程并估算地下水可开采量。结果表明：(1) 民勤县地下水位动态类型可划分为开采型、灌溉入渗–开采型、河流入渗–开采型和径流型。(2) 民勤盆地地下水位多年来整体下降，其中灌区下降明显，最大降幅为22 m，沙漠区略有下降，地下水多年累计亏损24.45×10^8 m^3。(3) 石羊河综合治理后水位下降明显减缓并出现局部回升，部分年份储变量为正。(4) 明确地下水动态主要影响因素为开采量和地表引水量。将地下水量变化过程划分为迅速下降期（1985—2000年）、稳定下降期（2001—2006年）、治理期（2007—2009年）和平稳/上升期（2010—2016年）。(5) 在现状地表供水情况下红崖山灌区地下水可开采量约0.61×10^8 $m^3\cdot d^{-1}$。

关 键 词：地下水位动态；地下水储变量；影响因素；民勤
文章编号：

民勤位于石羊河流域下游，延伸于腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠之间，是两大沙漠间的绿色屏障，具有重要的生态意义。民勤绿洲为灌溉型绿洲，有水即为良田，无水便成荒漠[1]，水资源的重要性不言而喻。近几十年，民勤盆地地下水位持续下降，造成一系列用水矛盾，并引发了植被退化、盐渍化、荒漠化等生态问题。为遏制生态恶化，2007年国家开始实施《甘肃石羊河流域重点治理规划》，对恢复当地生态环境具有一定的积极作用。

由于民勤具有典型的水资源和生态问题，国内外学者进行了大量研究。目前的研究成果主要包括水资源开发利用管理制度[2-7]、生态需水量[8-9]、地下水生态研究[10-13]等。诸多学者也对民勤盆地地下水动态进行了研究，如俄有浩等[14]系统研究了民勤沙井子地区的地下水动态，并做出地下水位预测；刘文杰等[15]使用统计学方法探究了2002年以后的民勤盆地地下水矿化度变化过程；宋冬梅等[16]进行地下水空间插值，得到埋深和矿化度的时空变化；马金辉等[17]利用地下水位年观测资料，利用地统计技术分析了当地地下水埋深的时空性。

现有研究主要以典型观测孔为研究对象，对区域整体水位变化，特别是地下水流场长期变化的分析不多。其次，对多年地下水量变化过程的研究不够丰富。为满足目前水位水量双控管理的需要，应对水位和水量两者进行结合，以更加清晰地描述地下水动态过程。本文通过计算民勤盆地多年地下水储变量探究当地地下水亏损情况。当前计算地下水储变量主要采用3种方法：对于监测井分布均匀、水位资料丰富的区域一般采用网格化方法[18]或分区叠加法[19-21]，水位数据不足的则可采用泰森多边形法[22-23]。

为解决民勤目前的水资源困境，研究多年来当

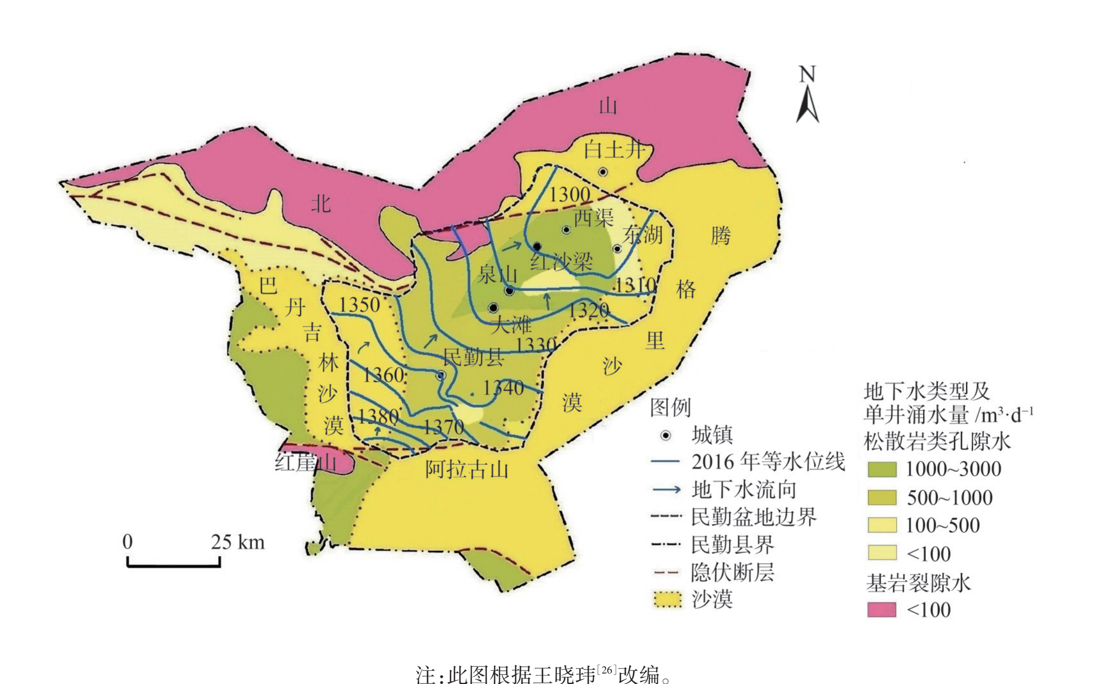
收稿日期：2020-10-22； **修订日期**：2021-06-11
基金项目：国家重点研发计划课题（2017YFC0406106）
作者简介：魏士禹（1994-），男，硕士研究生，主要从事地下水模拟研究. E-mail: 903568760@qq.com
通讯作者：崔亚莉（1962-），女，教授，主要从事水资源评价、数值模拟等研究. E-mail: cuiyl@cugb.edu.cn

地地下水开发利用进程及地下水动态变化过程十分重要。本文对民勤地下水动态类型进行划分，通过搜集大量历史监测水位及水量资料，分析了30余年来民勤地下水位变化特征，计算了地下水储变量并分析了其时空分布特征和演化趋势，进而为民勤地下水合理开发利用及生态恢复提供理论依据。

1 研究区概况

民勤为大陆性干旱气候，常年干旱少雨。民勤整体地形西南高东北低、较为平坦。地下水类型多为松散岩类孔隙水(图1)。地下130 m以内为潜水含水层，为砂砾、沙与亚黏土互层，其下为30 m厚的连续粘土层构成的弱透水层，再往深处为承压含水层。农业开采绝大部分集中于潜水含水层，也是本文重点研究的层位。民勤地下水补给来源主要包括农业灌溉入渗、渠系渗漏、大气降水、侧向径流；主要排泄途径为地下水开采，约占总排泄量的94%，其余为蒸发排泄。农业为民勤的支柱产业，主要灌区包括红崖山灌区、环河灌区、南湖灌区和昌宁灌区，其中红崖山灌区为混合灌区，其余灌区为地下水灌区。

20世纪70、80年代开始，石羊河上游社会经济发展大量使用水资源，进入民勤的地表水资源大大减少，无法满足工农业需求，不得不过量开采地下水。20世纪70年代民勤盆地年开采地下水2.5×10^8 $m^3\cdot a^{-1}$，80年代约2.8×10^8 $m^3\cdot a^{-1}$，到90年代初超过3×10^8 $m^3\cdot a^{-1}$(图2)。2001年地下水位相比1960年下降



注：此图根据王晓玮[26]改编。

图1 民勤县水文地质图

Fig. 1 Hydrogeological map of Minqin County

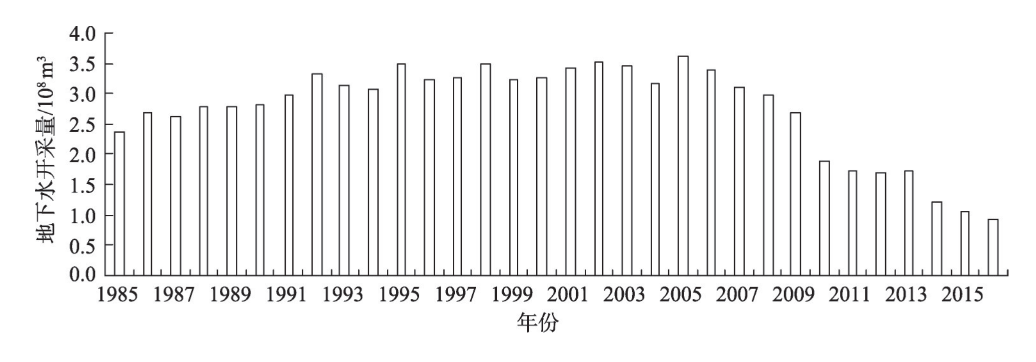


图2 民勤盆地历年地下水开采量

Fig. 2 Groundwater extraction over the years in Minqin Basin

约16 m,年均下降0.38 m·a^{-1}。造成民勤盆地地下水资源逐步枯竭、植被退化、沙漠入侵等一系列资源和环境问题。根据最新超采区划定[24],民勤盆地被划分为"武威市民勤浅层大型一般超采区",超采区面积1785.78 km^2。2007年《甘肃石羊河流域重点治理规划》实施,对流域内水资源进行统一管理和调配,地表来水量逐年增多,趋势率为2.0×10^8 m^3·a^{-1},水位下降得到有效遏制。沙漠和荒漠化面积由治理前的94.5%下降为89.8%,森林覆盖率由治理前的10.86%提高到17.91%[25],生态环境得以改善。

2 数据与方法

2.1 监测井数据

本文使用地下水监测数据来自民勤县水务局(1985—2016年)及甘肃省地矿局第二水文地质工程地质队(1981—2016年),其中105眼为民勤县水务局监测井,33眼为甘肃省第二水文地质队监测井(图3)。本文使用的气象、地下水开采量、地表水引水量等资料由甘肃省水文水资源局提供。

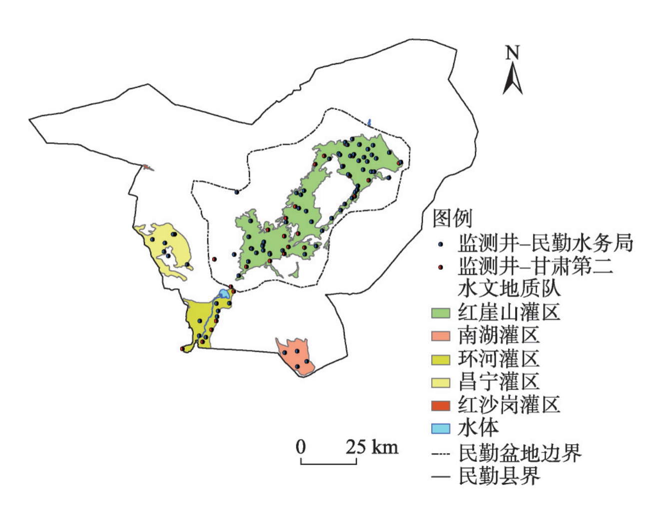


图3 民勤监测井分布

Fig. 3 Distribution of monitoring wells in Minqin

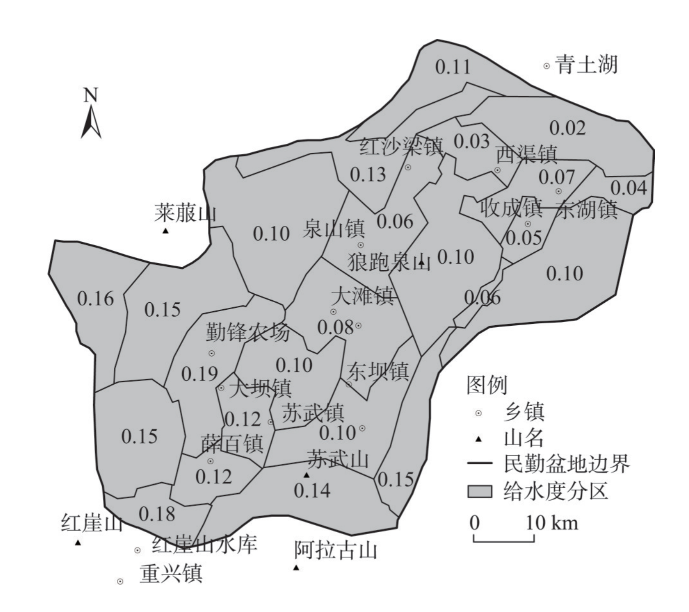
2.2 地下水储变量计算方法

本文采用网格化方法求民勤盆地浅层地下水年储变量,方法为:

(1) 将研究区剖分为400 m×400 m的网格,共计29100个;

(2) 利用克里金法将收集的监测井水位数据进行插值[27],得出各网格点1985—2016年各年的末水位值 $h_k^{i,j}$(其中 i,j 为网格编号,k=1985,1986,…,2016);

(3) 根据浅层含水层给水度分区(图4)将给水度离散到各网格点;



注:此图根据甘雨[28]改编,图中数字表示本分区给水度。

图4 民勤盆地给水度分区

Fig. 4 Specific water yield zones in the Minqin Basin

(4) 运用下式计算得到研究区各年储变量:

$$\Delta Q_k = 1.6\times10^5 \times \sum_{n=1}^{29100}\left(h_k^{i,j} - h_{k-1}^{i,j}\right)\times \mu^{i,j} \qquad (1)$$

式中:ΔQ_k 为年份 k 的地下水储变量(10^8 m^3·a^{-1});$h_k^{i,j}$ 为网格点(i,j)在年份 k 的末水位值(m);$h_{k-1}^{i,j}$ 为网格点(i,j)在年份 k-1的末水位值(m);$\mu^{i,j}$ 为网格点(i,j)的含水层给水度。

3 结果与分析

3.1 民勤县地下水位动态类型及其特征

研究区影响水动态的主要因素有地下水人工开采、河渠渗漏、田间灌溉入渗、大气降水等,其中地下水开采是研究区地下水位动态变化的主要因素。根据影响地下水位动态的主要因素和水位动态特征,民勤县浅层地下水位可划分为开采型、灌溉入渗–开采型、河流入渗–开采型和径流型4种动态类型(图5a~d)。

开采型主要分布于南湖乡、昌宁乡,无地表水灌溉,地下水开采强度大。以南湖甘草井为例,绘制多年平均月水位动态变化图。如图5d所示,农业开采开始于3月,水位开始下降;5—7月为地下水用

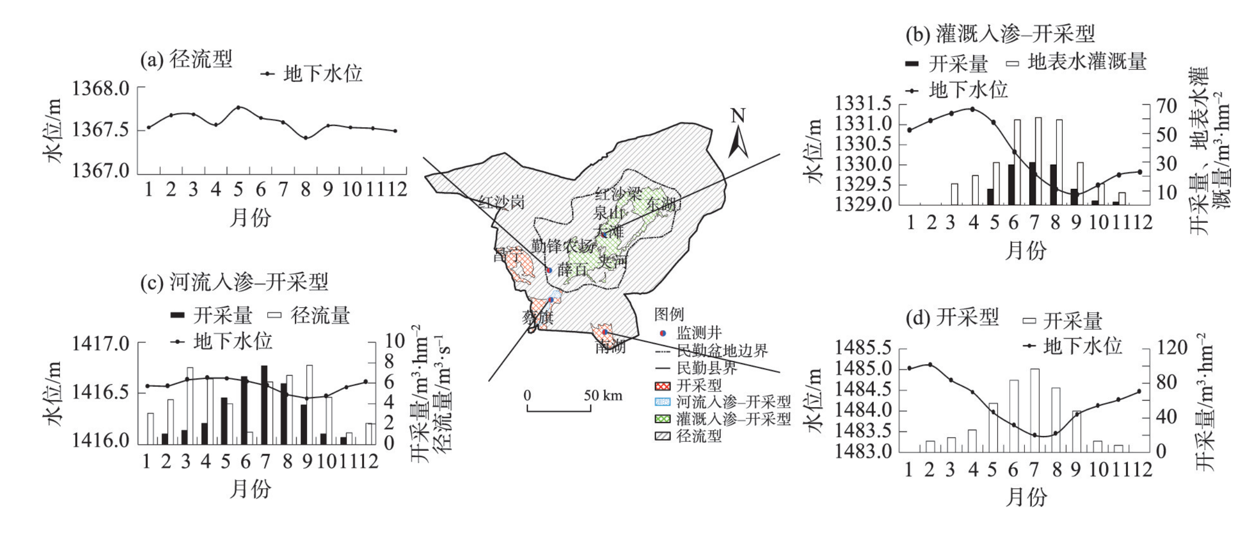


图5　民勤县地下水动态类型分区及水位动态变化

Fig. 5　Groundwater dynamic type division and water level dynamic change in Minqin County

水高峰期，水位继续下降；9月以后农业活动减弱，开采逐渐减少，水位缓慢上升。此区域年内水位波动最大1.7 m，平均年水位下降0.55 m·a^{-1}。2000年以来，该类型地下水位平均下降6.76 m·a^{-1}。

灌溉入渗–开采型分布于红崖山灌区，是民勤盆地的主体，该区人口最密集、农业活动最为强烈，属于地表水、地下水混灌区，所以地下水位动态主要受地下水开采和地表水灌溉双重影响。以泉山镇50号井为例(图5b)，多年平均月水位变化为：1—4月无开采，地下水位缓慢上升；4月农业开采开始，水位迅速下降；9月农业活动减弱，水位下降速率放缓；10、11月普遍使用地表水冬灌，水位有所回升。此区域年内地下水位波动大，最大变幅2.11 m，年末水位较年初下降 约1 m。1985年以来，该类型地下水位平均下降13.15 m·a^{-1}。

河流入渗–开采型分布于石羊河道附近和红崖山水库下游，地表水体对地下水形成持续补给。以距石羊河1.6 km的下案四社监测井为例(图5c)，多年平均月水位变化为：1—4月无开采，受河流侧向补给，水位持续上升；4月后，开采量超过河流补给量，水位下降；9月后地下水位逐渐回升。此区域开采量少，同时接受河流补给，年内水位稳定，最大变幅0.2 m，年末水位与年初基本持平。

径流型主要分布于荒漠区，地下水位受人类活动影响微弱。以1993年的荒漠区94号井水位变化为例(图5a)。此区域主要受自然状态下地下水径流影响，年内地下水位小幅度波动，最大变幅0.35 m。年末水位与年初水位基本持平。

3.2　民勤盆地地下水位变化特征

以红崖山灌区以及外围为研究区，收集民勤盆地浅层潜水水位数据，选择记录连续、完整的监测数据，同时尽可能保证监测井分布均匀。最终得到21眼监测井，绘制1985—2016年逐年年均水位等值线图，并给出1985、2000、2007、2016年4个典型年的地下水位等值线图(图6a~d)。

地下水位从民勤盆地西南到东北递减，说明地下水总体流向为由西南至东北方向。相比于1985年，2000年民勤盆地水位整体下降，在苏武镇东部、大滩镇及收成镇附近出现3个较大的下降中心，至2007年，水位继续下降。石羊河综合治理后，至2016年水位下降速度放缓，勤锋农场、红沙梁镇东部水位略有下降，东湖镇等部分区域出现水位回升，最大回升速率达0.2 m·a^{-1}。

将2016年和1985年民勤盆地流场叠加相减，得到32 a地下水位变幅图(图7)。相比1985年，2016年民勤盆地水位整体下降。在农业集中开采的民勤县城南部、泉山以南和东湖，降幅分别达到20 m、22 m、16 m。民勤县城农业开采量很少，地下水供少量工业及生活使用，多年地下水位下降幅度仅为8 m。民勤盆地2侧的荒漠区多年地下水位相比于中部绿洲区变化较小，略有下降。

3.3　民勤盆地地下水储变量时空分布特征

1985—2016年民勤盆地浅层地下水储变量和累计储变量情况见图8，32 a内地下水累计储变量

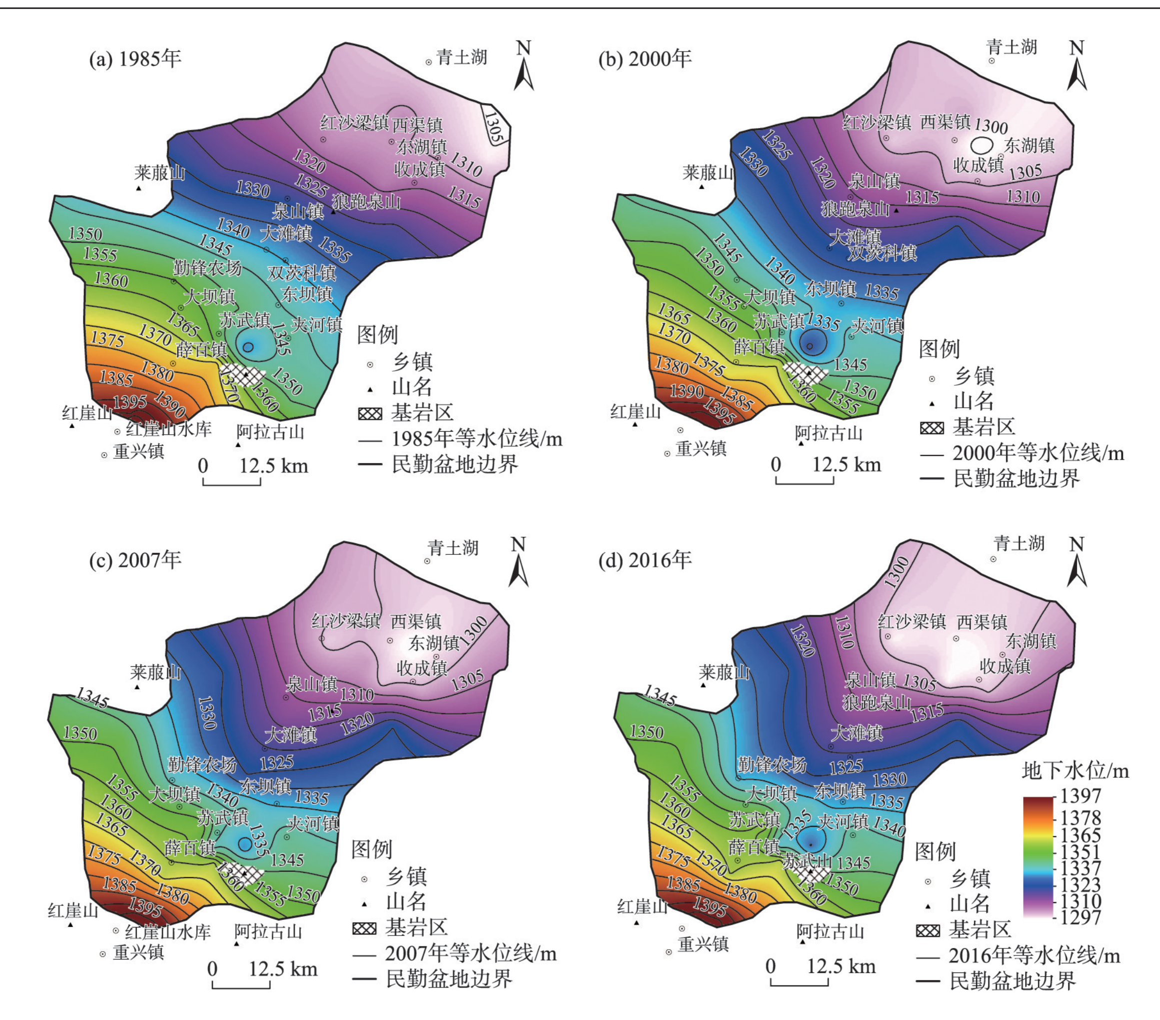


图6 民勤盆地年均地下水位等值线图

Fig. 6 Contour map of annual average groundwater level in the Minqin Basin

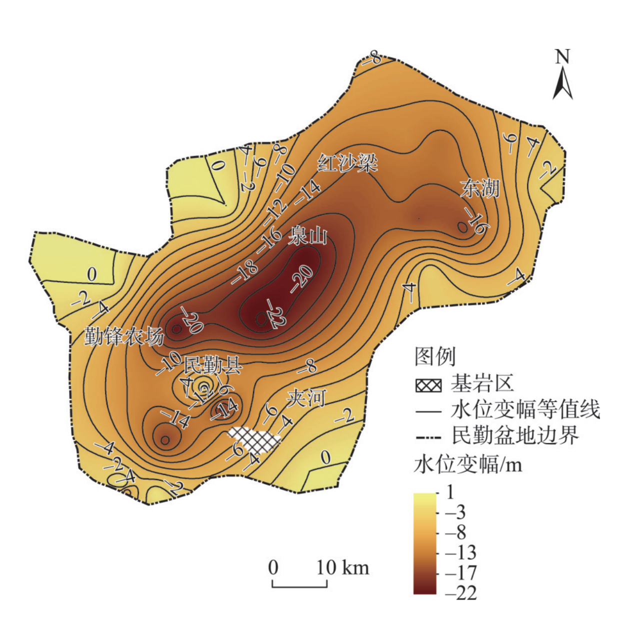


图7 1985—2016年民勤盆地地下水位变幅

Fig. 7 Amplitudes of groundwater level fluctuation in the Minqin Basin from 1985 to 2016

为$-24.45\times10^8\ m^3$，2011年后，年储变量正负交替，但总体还是呈负均衡。

表1给出了红崖山灌区和外围区（荒漠区）地下水储变量，可以看出，由于红崖山灌区地下水开采量大，形成区域地下水位降落漏斗中心，年均地下水储变量$-0.43\times10^8\ m^3\cdot a^{-1}$，尽管荒漠区没有地下水开采，由于向红崖山灌区径流，地下水位也持续下降，年均地下水储变量$-0.33\times10^8\ m^3\cdot a^{-1}$。

3.4 民勤盆地地下水储变量变化趋势分析

民勤盆地自20世纪80年代开始地下水位大幅下降，初步认为是自然和人类活动2方面因素共同造成的结果。民勤盆地气候干旱，年均降水量仅113 mm，入渗补给量小，对多年地下水储变量和降雨量进行相关性分析，Pearson相关系数仅为0.24，相关性微弱。民勤盆地蒸发强烈，而绝大部分地区地下水埋深大于10 m，最深可达40 m，远大于蒸发

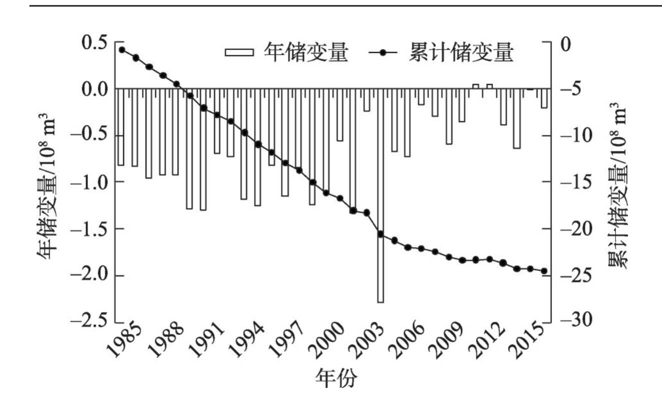


图8 1985—2016年民勤盆地地下水储变量变化

Fig. 8 Variation of groundwater storage variables in the Minqin Basin from 1985 to 2016

极限埋深，潜水蒸发微弱，可忽略[29]。由于民勤盆地地表来水受红崖山水库调控，与上游冰雪融水自然补给基本无关。盆地内与地下水相关的人类活动主要为开采和灌溉。地下水开采量与储变量的Pearson相关系数为-0.611，呈高度相关；地表水引水量与储变量的Pearson相关系数为0.409，呈中度相关，说明决定民勤盆地储变量大小的关键因素为开采量，其次为地表水引水量。

根据计算得到的储变量，结合多年开采量、引水量变化，可将20世纪80年代以来民勤盆地地下水量变化划分为4个阶段：(1) 稳定下降期(1985—2000年)。1985年后，受农业垦荒影响地下水开采量上升，石羊河上游经济发展，地表来水量持续下降。地下水储变量在-1×10^8 m³·a⁻¹左右波动。(2) 波动下降期(2001—2006年)。地下水开采量在3×10^8 m³·a⁻¹以上，地表来水量基本低于1×10^8 m³·a⁻¹。除2004年外，地下水年亏损量相比2000年前整体有所减少。(3) 治理期(2007—2009年)。2007年石羊河综合治理启动，地下水开采量开始下降，同时上游来水量大量增加。地下水储变量波动于-0.1×10^8 m³·a⁻¹至-0.6×10^8 m³·a⁻¹。(4) 平稳/上升期(2010—2016年)。地下水开采量稳定于0.85×10^8 m³·a⁻¹，地表引水量稳定于2×10^8 m³·a⁻¹。地下水储变量正负交替，2011、2012年和2015年出现正均衡。地下水位下降速率大大减缓，局部出现回升(图9)。

将以上各项数据进行线性回归拟合，得到民勤盆地灌溉入渗-开采型动态区的回归方程：

$$\Delta Q = -0.361\times \mathrm{QD} + 0.001\times \mathrm{QI} + 0.218 \qquad (2)$$

式中：ΔQ为地下水储变量(10^8 m³·a⁻¹)；QD为地下水开采量(10^8 m³·a⁻¹)；QI为地表水灌溉量(10^8 m³·a⁻¹)。

据上式，如果储变量为0，即保证地下水位不下降，在保证有2×10^8 m³·a⁻¹的地表引水量条件下，则地下水的开采量为0.61×10^8 m³·a⁻¹，该量可作为地下水的可开采量。

4 结 论

本文充分分析了20世纪80年代以来的大量地下水位资料，在此基础上划分了民勤县地下水动态

表1 1985—2016年民勤盆地内各动态区储变量统计

Tab. 1 Statistics of storage variables in various dynamic areas in the Minqin Basin from 1985 to 2016

动态区	面积/km²	储变量/10⁸ m³·a⁻¹	储变量模数/10⁴ m³·km⁻²·a⁻¹	开采量/10⁸ m³·a⁻¹	开采模数/10⁵ m³·km⁻²·a⁻¹
灌溉入渗-开采型	1502.3	-0.43	-2.86	2.65	1.76
径流型	3183.2	-0.33	-1.04	0	0
合计	4685.5	-0.76		2.65	

注：由于开采型和河流入渗-开采型不在民勤盆地范围内，因此不做计算。

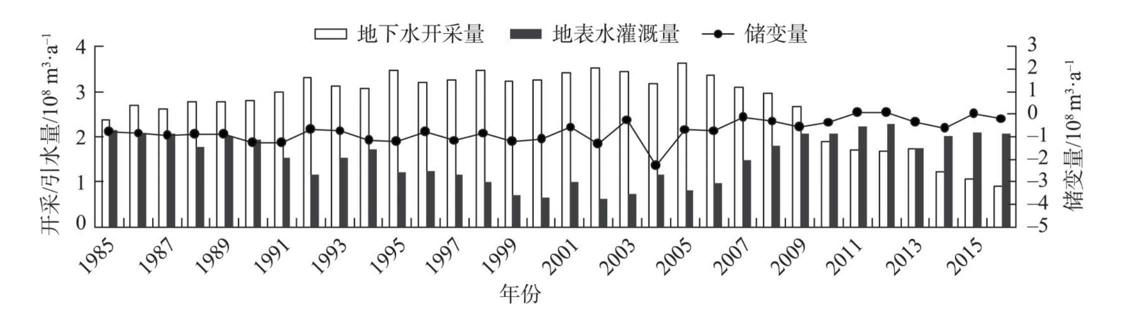


图9 1985—2016年民勤盆地开采量、引水量及储变量

Fig. 9 Water mining, diversion and storage volumes in the Minqin Basin from 1985 to 2016

类型。通过绘制流场图，分析了30余年来民勤地下水位变化过程，利用网格法计算了地下水年储变量，并分析了其时空分布特征和演化趋势，得到以下结论：

（1）民勤地下水动态类型包括开采型、灌溉入渗–开采型、河流入渗–开采型和径流型4种类型，其年内和年际变化特征各有不同：开采型、灌溉入渗–开采型年内水位波动大，多年地下水位平均下降分别为6.76 $m\cdot a^{-1}$和13.15 $m\cdot a^{-1}$。河流入渗–开采型和径流型年内水位平稳，年末水位与年初基本持平。

（2）民勤盆地地下水整体流向为西南至东北。石羊河流域综合治理前，水位整体快速下降；治理后地下水位下降幅度迅速减小，东湖镇等局部区域出现水位回升，最大回升速率达0.2 $m\cdot a^{-1}$，说明综合治理对遏制地下水位下降有一定作用。

（3）受综合治理影响，2011年后民勤盆地年储变量呈正负交替。自20世纪80年代中期至2016年累计亏损地下水24.45×10^8 m^3，灌区地下水位下降明显，最大降幅达22 m。荒漠区及县城水位略有下降。灌溉入渗–开采型的储变量模数和开采模数分别为-2.86×10^4 $m^3\cdot km^2\cdot a^{-1}$和$1.76\times10^5$ $m^3\cdot km^2\cdot a^{-1}$，径流型分区的储变量模数为$-1.04\times10^4$ $m^3\cdot km^2\cdot a^{-1}$。

（4）民勤盆地地下水储变量的影响因素主要为开采和地表水灌溉，为缓解水资源短缺，仍应限制地下水开采并进一步引入地表水。在现状地表供水条件下，民勤盆地地下水开采量不宜超过0.61×10^8 $m^3\cdot a^{-1}$。

参考文献(References)

[1] 李宗礼. 民勤绿洲水资源承载能力初步研究[C]//王继和. 中国西北荒漠区持续农业与沙漠综合治理国际学术交流会论文集. 兰州: 兰州大学出版社, 1998. [Li Zongli. Preliminary study on water resources carrying capacity of Minqin Oasis[C]//Wang Jihe. Proceedings of the International Academic Exchange Conference on Sustainable Agriculture and Integrated Desert Control in Northwest China. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1988.]

[2] 刘江, 付强. 地下水开采量和水位双控管理模式探讨[J]. 地下水, 2017, 39(3): 62–63. [Liu Jiang, Fu Qiang. Discussion on the dual control management mode of groundwater extraction volume and water level[J]. Ground Water, 2017, 39(3): 62–63.]

[3] 曲炜. 节水型社会建设要推进地下水双控管理[J]. 中国水利, 2018(6): 27–29. [Qu Wei. Establishment of water-saving society needs to boost dual control for groundwater utilization[J]. China Water Resources, 2018(6): 27–29.]

[4] 李军德. 关于民勤县水资源管理模式的探索[J]. 江西农业, 2017(17): 67. [Li Junde. Exploration of water resources management model in Minqin County[J]. Jiangxi Agriculture, 2017(17): 67.]

[5] 李风萍. 关于甘肃省民勤县水资源管理的几点思考[J]. 北京农业, 2015(18): 128. [Li Fengping. Some thoughts on water resources management in Minqin County, Gansu Province[J]. Beijing Agriculture, 2015(18): 128.]

[6] 徐青霞. 浅谈民勤县水资源精细化管理模式[J]. 甘肃水利水电技术, 2016, 52(12): 11–13. [Xu Qingxia. Talking about the fine management mode of water resources in Minqin County[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2016, 52(12): 11–13.]

[7] 王红, 石培基. 武威市城镇化与水土资源效益协调性分析[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 963–969. [Wang Hong, Shi Peiji. Coordination degree of urbanization and land water resources benefits of Wuwei City[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(5): 963–969.]

[8] 王化齐, 蔡焕杰, 张鑫. 石羊河下游民勤绿洲恢复地下水位生态需水量研究[J]. 水土保持通报, 2006, 26(1): 44–49. [Wang Huaqi, Cai Huanjie, Zhang Xin. Ecological water demand for restoration of groundwater level in Minqin Oasis in lower reach of Shiyang River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(1): 44–49.]

[9] 徐先英, 丁国栋, 孙保平, 等. 内陆河下游民勤绿洲主要防风固沙植被生态需水量研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 144–148. [Xu Xianying, Ding Guodong, Sun Baoping, et al. Ecological water requirement of major sand shifting control forests in Minqin Oasis of lower reaches of inland river[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(3): 144–148.]

[10] 汪新波, 粟晓玲. 基于T-S模糊神经网络的民勤地下水水质综合评价[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 188–192, 198. [Wang Xinbo, Su Xiaoling. Comprehensive assessment of groundwater quality in Minqin Basin based on T-S Fuzzy Neural Network[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(1): 188–192, 198.]

[11] 杨怀德, 冯起, 黄珊, 等. 民勤绿洲水资源调度的生态环境效应[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(7): 68–73. [Yang Huaide, Feng Qi, Huang Shan, et al. Environmental effects of surface water reallocation in Minqin Oasis[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(7): 68–73.]

[12] 柳菲, 陈沛源, 于海超, 等. 民勤绿洲不同土地利用类型下土壤水盐的空间分布特征分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 406–414. [Liu Fei, Chen Peiyuan, Yu Haichao, et al. Spatial distribution characteristics of soil water and salt under different land use types in Minqin Oasis[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 406–414.]

[13] 马倩倩, 董博, 许旺旺, 等. 干旱区耕地质量等级评价及土壤养分与盐渍化的分析研究——以民勤绿洲为例[J]. 干旱区地理, 2021, 44(2): 514–524. [Ma Qianqian, Dong Bo, Xu Wangwang, et

al. Evaluation of cultivated land quality and analysis of soil nutrients and salinization in arid areas: Taking Minqin Oasis as an example[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2): 514–524.]

[14] 俄有浩, 严平, 仲生年, 等. 民勤沙井子地区地下水动态研究[J]. 中国沙漠, 1997, 17(1): 72–78. [E Youhao, Yan Ping, Zhong Shengnian, et al. Research on groundwater dynamics in Shajingzi area of Minqin[J]. Journal of Desert Research, 1997, 17(1): 72–78.]

[15] 刘文杰, 苏永中, 杨荣, 等. 民勤地下水水化学特征和矿化度的时空变化[J]. 环境科学, 2009, 30(10): 2911–2917. [Liu Wenjie, Su Yongzhong, Yang Rong, et al. Hydrochemical characteristics and spatial-temporal variation of mineralization for the groundwater in Minqin Oasis[J]. China Journal of Environmental Science, 2009, 30(10): 2911–2917.]

[16] 宋冬梅, 肖笃宁, 马明国, 等. 民勤湖区地下水资源时空变化对灌区景观生态安全的影响研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1815–1820. [Song Dongmei, Xiao Duning, Ma Mingguo, et al. Impact of groundwater resource temporal-spatial change in Minqin Oasis on ecological security of irrigation region landscape[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10): 1815–1820.]

[17] 马金辉, 韩金华, 张艳林. 近10 a来民勤盆地地下水埋深的空间异质性分析[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1): 1–7. [Ma Jinhui, Han Jinhua, Zhang Yanlin. Analysis of spatial heterogeneity of groundwater depth in Minqin Basin in recent 10 years[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(1): 1–7.]

[18] 李大鸣, 孙仲谋, 张弘强, 等. 唐山市古冶区地下水数学模型研究及应用[J]. 中国给水排水, 2019, 35(19): 72–76. [Li Daming, Sun Zhongmou, Zhang Hongqiang, et al. Application of groundwater mathematical model for Guye District, Tangshan City[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(19): 72–76.]

[19] 孟春丽, 王闯, 魏雅琴. 2013年中牟县地下水动态及水量平衡分析[J]. 河南水利与南水北调, 2014(14): 9–10. [Meng Chunli, Wang Chuang, Wei Yaqin. Groundwater dynamics and water balance analysis in Zhongmu County in 2013[J]. Water Resources & South to North Water Diversion, 2014(14): 9–10.]

[20] 代俊宁. 滹沱河冲洪积扇地下水回灌研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014. [Dai Junning. The study on groundwater recharge programs in alluvial fan of Hutuo River[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.]

[21] 周文. 鄯善县南盆地地下水动力场演化规律研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(3): 169–172. [Zhou Wen. Study on evolution law of groundwater's dynamic field in south basin of Shanshan [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(3): 169–172.]

[22] 韩志国. 地下水蓄变量计算方法的探讨[J]. 治淮, 2008(11): 21–22. [Han Zhiguo. Discussion on calculation method of groundwater storage variable[J]. Harnessing the Huaihe River, 2008(11): 21–22.]

[23] 袁健, 马小雷, 金鹏飞, 等. 基于泰森多边形法的地下水平均水位计算[J]. 地下水, 2016, 38(3): 29–30, 35. [Yuan Jian, Ma Xiaolei, Jin Pengfei, et al. Calculation of average groundwater level based on Thiessen polygon method[J]. Ground Water, 2016, 38(3): 29–30, 35.]

[24] 甘肃省水文水资源局. 甘肃省地下水超采区评价报告[R]. 兰州: 甘肃省水文水资源局, 2014. [Gansu Provincial Hydrology and Water Resources Bureau. Evaluation report on groundwater over-exploitation area in Gansu Province[R]. Lanzhou: Gansu Provincial Hydrology and Water Resources Bureau, 2014.]

[25] 赵明瑞, 彭祥荣, 徐天军, 等. 石羊河流域综合治理以来民勤绿洲生态变化分析[J]. 中国农学通报, 2019, 35(30): 106–111. [Zhao Mingrui, Peng Xiangrong, Xu Tianjun, et al. Ecological changes of Minqin Oasis since comprehensive management of the Shiyang River Basin[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(30): 106–111.]

[26] 王晓玮. 我国西北超采区地下水水量–水位双控指标确定研究——以民勤盆地为例[D]. 北京: 中国地质大学, 2017. [Wang Xiaowei. Study on the dual control of groundwater abstraction amount and table in groundwater over-exploitation zones in northwest China: A case study in Minqin Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.]

[27] 李俊晓, 李朝奎, 殷智慧. 基于ArcGIS的克里金插值方法及其应用[J]. 测绘通报, 2013(9): 87–90, 97. [Li Xiaojun, Li Chaokui, Yin Zhihui. Kriging interpolation method based on ArcGIS and its application[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(9): 87–90, 97.]

[28] 甘雨. 民勤盆地地下水压采方案及监测井网优化研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017. [Gan Yu. The study on groundwater reducing mining scheme and optimization of monitoring well network in Minqin Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.]

[29] 柳菲. 民勤绿洲土壤水盐特征及其与地下水的关系[D]. 兰州: 兰州大学, 2019. [Liu Fei. Characteristics of soil water and salt and its relationship with groundwater in Minqin Oasis[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.]

Dynamic characteristics of groundwater level and storage variables in Minqin from 1985 to 2016

WEI Shiyu[1,2], GUO Yuntong[1], CUI Yali[1], ZHANG Qiulan[1], SHAO Jingli[1]

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Haihe River Water Conservancy Commission, MWR, Tianjin 300170, China)

Abstract: The Minqin County, Gansu Province is located between two large deserts (the Badain Jaran Desert and Tengger Desert) of northern China. In recent decades, the groundwater level in Minqin has continued to decline, and water resources are severely in short supply. Accordingly, analyzing the process of groundwater development and utilization over the years, as well as the dynamic characteristics of groundwater changes, is particularly important in correctly guiding the rational development and utilization of local groundwater and ecological restoration. Based on the collection and analysis of 138 water level data, this study delineated the groundwater dynamic types of Minqin County and used the Kriging interpolation method to plot year-by-year the groundwater flow field and the water level changes in the Minqin Basin from 1985 to 2016. The grid method was utilized to calculate the multi-year storage variables of groundwater. The influencing factors of the groundwater level in the Minqin Basin were explored; a regression equation was obtained; and the recoverable amount of groundwater was estimated. The results are presented herein. First, the groundwater level in Minqin can be divided into four dynamic types, that is, mining, irrigation infiltration-exploitation, river infiltration-exploitation, and runoff. Second, the overall groundwater level dropped over the years. The irrigation area significantly dropped, with a maximum drop of 22 m. The desert area also slightly dropped. The groundwater suffered a cumulative loss of 24.45×10^8 m^3 over the years. Third, after the comprehensive treatment of the Shiyang River, the water level decline significantly slowed down, and a partial rise was observed. The storage variables were positive in some years. Fourth, the main influencing factors of the groundwater dynamics are extraction volume and surface water diversion volume. The groundwater volume change process is divided into a rapid decline period (1985—2000), a stable decline period (2001—2006), a treatment period (2007—2009), and a steady/increasing period (2010—2016). Lastly, under the current surface water supply, the groundwater recoverable volume in Hongyashan Irrigation District is approximately 0.61×10^8 $m\cdot a^{-1}$.

Key words: groundwater level dynamics; groundwater storage variables; influencing factors; Minqin